

# VU Research Portal

## Dynamiek van technologie-ontwikkeling: innovatie, adoptie en diffusie

de Groot, H.L.F.; Hofkes, M.W.; Mulder, P.; Smulders, S.

### ***published in***

Milieubeleid en technologische ontwikkeling  
2004

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### ***citation for published version (APA)***

de Groot, H. L. F., Hofkes, M. W., Mulder, P., & Smulders, S. (2004). Dynamiek van technologie-ontwikkeling: innovatie, adoptie en diffusie. In W. J. H. van Groenendaal, M. W. Hofkes, R. Kemp, & H. R. J. Vollebergh (Eds.), *Milieubeleid en technologische ontwikkeling* SDU Uitgevers. <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=12592>

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

## Hoofdstuk 3

### Dynamiek van technologie-ontwikkeling: innovatie, adoptie en diffusie

*Henri L.F. de Groot*

*Marjan Hofkes*

*Peter Mulder*

*Sjak Smulders<sup>1</sup>*

#### 3.1 Inleiding

De laatste decennia laten een drastische toename van de uitstoot van broeikasgassen zien. Inmiddels wordt algemeen erkend dat het versterkte broeikaseffect in belangrijke mate door de mens wordt veroorzaakt. Het versterkte broeikaseffect zal naar verwachting leiden tot klimaatveranderingen, die overwegend als onwenselijk worden beschouwd. Om te komen tot een stabilisatie van broeikasgassen in de atmosfeer is een reductie van energieverbruik en daarmee gepaard gaande emissies vereist. Dit vraagt om beleid aangezien niet verwacht kan worden dat 'de markt' deze reductie tot stand zal brengen, gegeven onder meer het bestaan van afwentelingprocessen ('externaliteiten') en gebrek aan prijsprikkels ('ongeprijsde schaarste').

Om te komen tot een reductie van energieverbruik en daarmee gepaard gaande emissies zijn er in principe drie mogelijkheden. De eerste optie is minder produceren en een lagere economische groei accepteren. De tweede optie is het wijzigen van de samenstelling van ons consumptie- en productiepakket in de richting van minder energie-intensieve goederen. Dit kan worden bereikt door minder energie-intensieve goederen te consumeren en produceren, maar ook door delen van de energie-intensieve productie naar het buitenland te verplaatsen. Een derde optie is het verhogen van de energie- of emissie-efficiëntie (oftewel het verlagen van de energieverbruik en emissies per eenheid product) door middel van technologische vooruitgang. De tweede optie werkt doelgerichter toe naar minder emissies en heeft lagere kosten dan de eerste optie, maar de mogelijkheden om bij gelijkblijvende groei via sectorale verschuivingen emissies te reduceren raken op den duur uitgeput. Duurzame vermindering van energiegebruik met behoud van groei kan alleen bij voortdurende technologische vooruitgang. Het stimuleren van schonere technologie zal daarom een sleutelrol vervullen voor een duurzame oplossing van het klimaatprobleem.

In verschillende bottom-up analyses is beargumenteerd dat er een groot potentieel aan goedkope technologische opties voorhanden is waarmee reductiedoelstellingen vrij eenvoudig kunnen worden bereikt (zie, bijvoorbeeld, de Beer 1998, IWG 1997). De praktijk van alledag wijst anders uit. Veel van de opties die bottom-up analyses als attractief aanwijzen, blijken in de praktijk niet of slechts met zeer grote vertragingen te worden toegepast. Dit verschijnsel staat bekend als de 'energy-efficiency paradox'. De hoofddoelstelling van dit hoofdstuk is verklaringen te bieden voor deze 'energy-efficiency paradox' en hieruit lessen te trekken voor beleid.

---

<sup>1</sup> We danken Frank Dietz, René Kemp en Herman Vollebergh voor nuttig commentaar op een eerdere versie van dit hoofdstuk.

### HOOFDSTUK 3

We zullen betogen dat de zogenaamde netto-contante waarde beslisregel, op grond waarvan bottom-up analyses veelal bepalen of technologieën voor adoptie in aanmerking zouden moeten komen, tekortschiet ter verklaring van diffusiegedrag. De beslisregel heeft alleen verklaringskracht in situaties die in de praktijk vrij uitzonderlijk zijn. In deze situaties is bovendien de beslisregel moeilijk volledig toe te passen omdat niet alle benodigde data gemakkelijk te verzamelen zijn. Berekeningen op grond van deze beslisregel zullen hierdoor feitelijk adoptiegedrag slechts gedeeltelijk kunnen verklaren en geven een gebrekkige richtlijn voor beleid. Om de 'energy-efficiency paradox' te verklaren gaan we te rade bij relatief recente ontwikkelingen op het onderzoeksterrein van adoptiegedrag. Deze geven een meer adequate beschrijving van *feitelijk gedrag* van economische actoren. Centraal in deze ontwikkelingen staat ook de aandacht voor de complexiteit van technologieën en de mogelijke interacties tussen verschillende typen technologieën. Met het in kaart brengen van de factoren die het niet-adopterende van technologieën kunnen verklaren, hopen we aangrijpingspunten te bieden voor beleid gericht op het verhogen van energie-efficiëntie.

In dit hoofdstuk zal de nadruk liggen op de *adoptie* van energie-efficiënte technologie. Bij technologische vooruitgang gaat het per definitie om technologische vernieuwingen in productieprocessen en productassortiment. Het verbaast daarom niet dat veel onderzoek en beleid gericht is op respectievelijk het bestuderen en stimuleren van innovatie. Het is echter even vanzelfsprekend dat innovatie *alleen* niet tot een reductie van energieverbruik en daarmee gepaard gaande emissies zal leiden. Daarvoor is het per definitie ook nodig dat nieuwe technologieën worden geadopteerd. Evenmin als innovatie, is adoptie van reeds bestaande technologie een eenvoudige zaak voor bedrijven. Het begrijpen van de barrières waarmee bedrijven worden geconfronteerd, het analyseren van feitelijk adoptiegedrag en het bestuderen van de mogelijkheden om deze barrières middels beleidsmaatregelen weg te nemen wordt daarmee uitermate belangrijk.

Feit is echter dat de aandacht voor technologie-ontwikkeling relatief groot is ten opzichte van de aandacht voor technologie-adoptie, terwijl – in elk geval op de korte en middellange termijn – het potentieel om met adoptie van bestaande energiebesparende technologie milieu-winst te behalen minstens zo groot is als met de ontwikkeling van nieuwe technologie. In zekere zin reflecteert de geringe aandacht voor adoptie de neoklassieke veronderstelling in de economische theorie dat technologie een publiek goed is, voor alle ondernemingen vrij toegankelijk, en dat zich rationeel gedragende ondernemingen altijd de best beschikbare technologie zullen aanwenden in hun streven naar maximale winst. De praktijk is anders. Adoptiekosten zijn volgens Jovanovic (1997) vele malen belangrijker dan kosten van innovatie. Daarbij onderstreept hij dat in feite elke beslissing tot adoptie een innovatie op zichzelf is. Immers, bij de adoptie van elke technologie dient een technologie aan bedrijfsspecifieke omstandigheden te worden aangepast alvorens effectief in gebruik te kunnen worden genomen. Daarbij is vaak ook om- of bijscholing van het personeel vereist. Om bovengenoemde redenen zullen we in dit hoofdstuk, zonder het belang van innovatie te willen bagatelliseren, onze aandacht richten op het proces van adoptie van technologie.

De opzet van dit hoofdstuk is als volgt. In paragraaf 3.2 wordt een elementair besluitvormingsmodel besproken dat ten grondslag ligt aan bottom-up analyses van adoptiegedrag, het zogenaamde netto-contante waarde model. Dit model geeft aan hoe kosten en baten tegen elkaar af te wegen bij het nemen van adoptiebeslissingen. De eenvoudigste beslisregel is dat een technologie wordt geadopteerd wanneer de netto-contante waarde van de betreffende technologie positief is. Het eerste probleem van deze beslisregel is dat kosten en baten moeilijk zijn te meten. Dit komt aan bod in paragraaf 3.3. Het tweede pro-

bleem is dat de beslisregel alleen verklaringskracht biedt onder strikte en vrij heroïsche veronderstellingen zoals volledige informatie, afwezigheid van onzekerheid en perfecte kapitaalmarkten. In de realiteit is aan deze veronderstellingen vaak niet voldaan, zodat de beslisregel minder geschikt wordt voor het verklaren van adoptiegedrag. Daarmee komen een aantal barrières voor adoptie van technologieën in zicht. Dit laatste is het onderwerp van paragraaf 3.4, waar we barrières voor technologie adoptie zullen bespreken aan de hand van alternatieve theoretische modellen die in de literatuur zijn voorgesteld om (aspecten van) het adoptiegedrag beter te kunnen analyseren. Met de bespreking van deze inzichten wordt een zo compleet mogelijk beeld gegeven van de huidige inzichten omtrent adoptiegedrag van bedrijven en de mogelijkheden om met behulp van beleid adoptiegedrag te beïnvloeden. In andere hoofdstukken in dit boek zal het theoretisch kader uit het onderhavige hoofdstuk veelvuldig terugkomen en zal een aantal van de theoretische inzichten empirisch nader worden getoetst. Paragraaf 3.5 bevat de belangrijkste conclusies van dit hoofdstuk.

### 3.2 Een elementair raamwerk voor analyse

#### 3.2.1 Het netto-contante waarde raamwerk

Een eenvoudige en vaak gehanteerde bedrijfseconomische beslisregel bij investeren in een nieuwe technologie is het zogenaamde NCW criterium, dat wil zeggen dat elk project met een positieve netto-contante waarde aantrekkelijk is om in te investeren.<sup>2</sup> De netto-contante waarde van een project wordt bepaald door de toekomstige baten voortvloeiend uit een investeringsproject te verdisconteren tegen een gegeven kapitaalkostenvoet en te verminderen met de contante waarde van alle te maken kosten. De netto-contante waarde (NCW) van een technologie  $i$  volgt uit toepassing van de volgende berekening:

$$NCW_i = -I_i + \sum_{t=1}^N \frac{S_{it} - C_{it}}{(1+r)^t}$$

In deze formule staat  $I_i$  voor de investeringskosten van de technologie  $i$  op tijdstip  $t = 0$ ,  $S_{it}$  en  $C_{it}$  zijn, respectievelijk, de jaarlijkse baten en kosten in monetaire eenheden die voortvloeien uit adoptie,  $r$  is de discontovoet waarmee toekomstige kosten en baten constant worden gemaakt, en  $N$  is de levensduur van de technologie. De formule stelt dat de

<sup>2</sup> Een vaak gehanteerde alternatieve maatstaf voor winstgevendheid is de interne discontovoet. Deze discontovoet is gelijk aan die discontovoet waarvoor de Netto-Contante Waarde gelijk is aan nul. Hoe groter de interne rentevoet, des te groter zijn de jaarlijkse netto baten ten opzichte van de initiële investeringskosten. De interne discontovoet is daarmee een goede maatstaf voor de rentabiliteit van de betreffende technologie. Een tweede alternatieve maatstaf voor winstgevendheid is de terugverdiendtijd. Deze maatstaf meet het aantal perioden dat een technologie in gebruik moet zijn – en dus het aantal perioden dat de onderneming de netto baten van het gebruik van de technologie opstrijkt – om de initiële investeringskosten terug te kunnen verdienen. Bij deze methode zal een onderneming overgaan tot adoptie als de terugverdiendtijd korter is dan de door de onderneming gehanteerde periode waarbinnen een technologie zich terugverdiend moet hebben, de zogenaamde kritische terugverdiendtijd. De fundamentele verschillen ten opzichte van het NCW criterium zijn dat bij toepassing van de terugverdiendtijd methode geen rekening wordt gehouden met de periode waarin de baten vallen (toekomstige kosten en baten worden niet verdisconteerd) en dat een beperkte tijdshorizon wordt gehanteerd (kosten en baten die buiten de kritische terugverdiendtijd vallen worden als het ware tegen een oneindig hoge discontovoet verdisconteerd).

netto- contante waarde positief is als, gemeten in contante waarde, de netto baten van adoptie groter zijn dan de (initiële) investeringskosten.

Marktconforme beleidsinstrumenten, zoals subsidies, emissieheffingen, en regelingen voor belastingaftrek, hebben een eenvoudig te berekenen effect op de netto-contante waarde van investeringsprojecten. Deze instrumenten beïnvloeden direct de kosten dan wel de baten en daarmee ook de adoptiebeslissing volgens het NCW criterium (voor een concrete uitwerking zie bijvoorbeeld het hoofdstuk over de werking van het subsidie-instrument). De analyse van regulering en standaarden is lastiger in het hierboven geschetste kader. Dergelijke maatregelen dienen immers in monetaire equivalenten te worden uitgedrukt alvorens in het afwegingskader te kunnen worden geplaatst.

### 3.2.2 Het NCW criterium als verklaring van adoptie

Om empirisch waargenomen adoptiegedrag te verklaren, kan worden aangenomen dat ondernemingen het NCW criterium hanteren bij hun investeringsbeslissingen. Deze veronderstelling is alleen gerechtvaardigd als aan de volgende voorwaarden is voldaan. De eerste voorwaarde is dat ondernemingen rationeel handelen, waarbij rationeel handelen gedefinieerd is als handelen gericht op het maximaliseren van winst, gegeven aanwezige beperkingen en met vermijding van systematische fouten in het maken van keuzen. Als tweede voorwaarde moeten ondernemingen beschikken over volledige informatie ten aanzien van zowel het bestaan van alle beschikbare technologieën als ook hun volledige kosten en baten. Ten derde moeten de ondernemingen over voldoende interne of externe financiële middelen beschikken om een winstgevende technologie ook daadwerkelijk te adopteren. Er zijn met andere woorden geen kapitaalmarktrestricties. Ten vierde mag er geen onzekerheid zijn met betrekking tot kosten en baten. In een dergelijke situatie zal een onderneming een technologie adopteren zodra deze een positieve netto-contante waarde heeft omdat deze dan de winstgevendheid van de onderneming als geheel verhoogt.

Met succes kunnen we bepaalde kenmerken van het adoptieproces verklaren aan de hand van het NCW criterium. Een deel van de oudere literatuur heeft zich toegelegd op economische verklaringen voor diffusiepatronen van een technologie. Een veelvuldig empirisch aangetoond diffusiepatroon kent een S-vormig karakter waarbij in de eerste fase na introductie weinig bedrijven overgaan tot adoptie, gevolgd door een fase met toenemende diffusiesnelheid als gevolg van adoptie door steeds meer bedrijven, om tenslotte uit te lopen op een fase met afnemende diffusiesnelheid als verzadiging van de markt in zicht komt. Een dergelijk typisch diffusiepatroon voegt in essentie twee elementen toe aan het besproken standaard adoptiemodel, namelijk een vorm van heterogeniteit en/of een graduele verspreiding van informatie over de betreffende technologie (Jaffe en Stavins, 1994). In het geval van heterogeniteit is gemakkelijk voor te stellen dat, bijvoorbeeld, in de situatie van geleidelijk stijgende energieprijzen eerst die ondernemingen een technologie adopteren voor wie de technologie relatief winstgevend is en later pas die ondernemingen voor wie de technologie minder winstgevend is. Wanneer de veronderstelling wordt gemaakt dat de winstgevendheid van een technologie grosso modo normaal is verdeeld over de ondernemingen resulteert een S-vormig diffusiepatroon (De Groot et al., 2002). Dit type model wordt wel met de term probit- of rank-model aangeduid (David, 1969, en Karsenas en Stoneman, 1995). De tweede verklaring voor S-vormige diffusiepatronen veronderstelt dat de informatie over het bestaan of de winstgevendheid van de technologie zich slechts geleidelijk verspreidt. Deze verklaring gaat uit van de veronderstelling dat de informatie van een technologie afhankelijk is van de mate van penetratie van de betreffende technologie. Initieel is een technologie slechts bij zeer weinig ondernemingen bekend en

zal de diffusie slechts traag zijn. Naarmate meer bedrijven adopteren wordt de technologie bekender bij meer ondernemingen die vervolgens ook tot adoptie over kunnen gaan. Dit type model is in de literatuur bekend als het epidemische model (Griliches, 1957, en Stoneman, 1983).

Minder succes hebben adoptiemodellen op basis van het NCW criterium bij de verklaring van adoptie van specifieke afzonderlijke technologieën. Dit probleem speelt met name bij zogenaamde bottom-up analyses van het economisch potentieel van energiebesparende technologieën. Veel van de technologieën die op basis van een netto-contante waarde bepaling met gebruikmaking van 'redelijke' discontovoeten<sup>3</sup> als winstgevend kunnen worden beschouwd, worden in de praktijk niet geadopteerd. Dit verschijnsel staat in de literatuur bekend als de zogenaamde 'energie-efficiëntie paradox' (naar Shama, 1983). Het is dit probleem dat ten grondslag ligt aan de veelal te positieve inschattingen van energie-besparingspotentiëlen die worden voorgerekend in bottom-up analyses. In het vervolg van dit hoofdstuk zullen we trachten de verklaringen voor dit verschijnsel te categoriseren. In de volgende paragraaf zullen we ingaan op verklaringen voor de paradox die in essentie neerkomen op problemen met het correct meten van alle relevante kosten en baten van technologie-adoptie (zie Ostertag, 1999). In paragraaf 3.4 komen vervolgens een aantal verklaringen aan de orde, waarbij de uitgangspunten van adoptiemodellen op basis van het netto-contante waarde criterium op een meer fundamentele manier ter discussie worden gesteld. We presenteren daarmee alternatieve adoptiemodellen die gedrag kunnen verklaren in situaties waarin niet voldaan is aan de vooronderstellingen die aan het NCW adoptiemodel ten grondslag liggen. Ook vragen we aandacht voor een aantal essentiële technologische karakteristieken.

### 3.3 Verborgen kosten en baten

De onderzoeker die op basis van het hierboven geschetste raamwerk een adequate inschatting wil maken van rentabiliteit van technologieën en energie-besparingspotentiëlen wordt geconfronteerd met het probleem dat hij/zij dient te beschikken over alle relevante kosten en baten die een rol spelen bij de investeringsbeslissing die wordt gemaakt door bedrijven. In de praktijk is daaraan zelden voldaan. Verschillende kosten- en batenposten zijn ofwel niet bekend, of variëren met bijvoorbeeld de aard van de onderneming die de technologie overweegt te adopteren. Dergelijke problemen zullen leiden tot verkeerde inschattingen van rentabiliteit en besparingspotentiëlen. Het valt daarbij niet uit te sluiten dat er sprake is van systematische onderschatting van kosten (of overschatting van baten), waarmee een mogelijke verklaring voor de energie-efficiëntie paradox kan zijn gevonden. In deze paragraaf zullen we verschillende categorieën van kosten en baten die moeilijk observeerbaar zijn voor een onderzoeker, maar mogelijk wel een rol spelen bij het afwegingsproces van bedrijven de revue laten passeren.

Ondernemingen maken, afgezien van de eenvoudig waarneembare kosten die samenhangen met de aanschaf van een technologie, ook kosten voor het vergaren van informatie, kosten van onderzoek, kosten van installatie, contractkosten, afdwingkosten, etc. Deze additionele kosten zijn vaak moeilijk empirisch meetbaar en lopen vaak sterk uiteen tussen ondernemingen. Met name de omvang van de onderneming, de beschikbaarheid van organisatorische kwaliteiten en de beschikbaarheid van menselijk kapitaal zijn relevante factoren die de (kosten)effectiviteit van de introductie van een nieuwe technologie be-

<sup>3</sup> Dat wil zeggen de rentevoet plus een risicopremie resulterend in discontovoeten van 10 à 15 %.

invloeden. Verschillende onderzoeken wijzen er direct of indirect op dat dergelijke kosten met name hoog zijn voor kleine en middelgrote ondernemingen. Het is dientengevolge waarschijnlijk dat standaard netto-contante waarde berekeningen de winstgevendheid van adoptie door met name kleine en middelgrote ondernemingen overschatten. Dit is eenvoudig te begrijpen aangezien het voor dergelijke ondernemingen lastig is om de schaalvoordelen die karakteristiek zijn voor de verzameling van informatie, het opstellen van contracten, etc. uit te buiten (zie De Groot et al., 2001, Hein en Blok, 1995 en Velthuisen, 1995). Voor dergelijke ondernemingen worden de kosten met andere woorden te laag ingeschat en vindt er minder adoptie plaats dan op grond van NCW berekeningen met optimistische kosteninschattingen wordt verwacht.

Ook bij de vaststelling van de jaarlijks terugkerende kosten kunnen empirisch problemen ontstaan. Te denken valt hier bijvoorbeeld aan rentelasten die uiteenlopen tussen verschillende typen ondernemingen. Nieuwe en kleine ondernemingen betalen over het algemeen een relatief hoge risicopremie (Ballantine et al., 1993). Ook zijn er verschillen tussen bedrijven in de verdeling van het financieel kapitaal over eigen en vreemd vermogen. Om de kapitaalkosten goed in kaart te kunnen brengen is inzicht in de samenstelling van vermogen essentieel omdat de kapitaalkosten voor eigen vermogen substantieel lager zijn dan voor vreemd vermogen. In principe is dergelijke informatie uiteraard te verkrijgen en zou in het analysekader van paragraaf 3.2.1 meegenomen kunnen worden. In de praktijk is het echter vaak lastig om voor alle ondernemingen dergelijke informatie te verkrijgen waardoor in de praktijk een verkeerde inschatting van de penetratiesnelheid van een technologie kan resulteren, in geval van toepassing van de netto-contante waarde methode.

Een tweede type kosten waarvan de inschatting empirisch lastig is en die sterk uiteen kunnen lopen voor verschillende typen bedrijven zijn kosten van onderhoud en reparatie. Vaak is het zo dat de kosten van onderhoud per eenheid capaciteit relatief laag zijn voor grootschalige machines. Kleine ondernemingen hebben echter vaak niet de benodigde omvang om onderhoud en reparatie intern te verzorgen. Zij dienen daartoe relatief dure onderhoudscontracten af te sluiten. Ook missen zij vaak de benodigde kennis en expertise (Kleinknecht, 1989). Net zoals bij de verborgen initiële investeringskosten is ook hier sprake van het onderschatten van de kosten: in werkelijkheid zijn de kosten hoger en vindt er minder adoptie plaats dan volgens de theorie verwacht wordt. Tot slot dient alvorens tot de aanschaf van een nieuwe technologie overgegaan wordt de huidige in gebruik zijnde installatie afgeschreven te worden. Het belang van dergelijke kosten als verklaring voor het niet adopteren van een nieuwe technologie is op basis van bedrijfsenquêtes aangetoond door De Groot et al. (2001) en Velthuisen (1995). Opgemerkt dient hier te worden dat dergelijke afwegingen uiteindelijk niet het besluit om al dan niet te adopteren beïnvloeden, maar wel de timing van adoptie.

De jaarlijkse baten, de tweede hoofdcomponent van een netto-contante waarde analyse, zijn eveneens moeilijk vast te stellen bij onderzoek naar diffusie. Ook hiervoor geldt dat die in belangrijke mate uiteen kunnen lopen tussen typen bedrijven. Zo is er bijvoorbeeld een grote groep bedrijven waarvoor geldt dat de energiekosten zeer laag zijn. Voor deze bedrijven kan betoogd worden dat het energiegebruik en de besparingen die daarop kunnen worden geboekt te beperkt zijn ten opzichte van de kosten van de aanschaf van de nieuwe technologie (inclusief informatiekosten e.d.) om adoptie winstgevend te maken. Hierbij spelen ook percepties een belangrijke rol. Bedrijven met een zeer beperkte energierekening beschouwen energiekosten vaak als 'overige' kosten en spelen daardoor een zeer beperkte rol in de investeringsbeslissingen van bedrijven (of zijn, met andere woorden, niet onderhevig aan een rationele besluitvorming). Resultaten van bij-

voorbeeld Gillissen et al. (1995) laten zien dat een lage energierekening daadwerkelijk een relevante barrière vormt voor ondernemingen om over te gaan tot adoptie. Bovendien is het zo dat grote bedrijven vaak substantiële kortingen weten te bedingen op hun energierekening. Dergelijke kosten dienen uiteraard op een adequate wijze in een netto-contante waarde analyse meegenomen te worden.

De laatste component van een netto-contante waarde analyse is de discontovoet. Bedrijven hanteren bij hun adoptie- en investeringsbeslissingen een discontovoet die ze op grond van ervaringen in het verleden afstemmen op vele overwegingen zoals risico en financieringsmogelijkheden. Tussen bedrijven verschilt daarom de discontovoet. Ook disconteren bedrijven verschillende projecten met een verschillende discontovoet om verschillen in risico of schaalvoordelen tot uitdrukking te brengen. De onderzoeker kan onmogelijk al deze nuances meenemen en kiest in de praktijk voor een uniforme discontovoet voor alle bedrijven en projecten. Hierdoor ontstaat een verschil tussen wat de onderzoeker meet aan netto-contante waarde van een project en wat het bedrijf op grond van zijn specifieke situatie en ervaring als realistische waarde inschat.

Tot nu toe hebben we ons beperkt tot een zeer eenvoudig besluitvormingsmodel dat de basis vormt voor bottom-up analyses. Dergelijke analyses komen vaak tot een te optimistische inschatting van besparingspotentiëlen. Een mogelijke oorzaak daarvan is een systematische onderschatting van kosten, een overschatting van baten, of een te gestyleerde bepaling van de discontovoet. Of er van dergelijke systematische fouten sprake is, is voor zover ons bekend niet te beantwoorden op basis van beschikbare empirische kennis. Wat daartoe vereist zou zijn is een zeer gedetailleerde analyse op bedrijfsniveau die het mogelijk maakt om op een adequate wijze alle kosten en baten die bij de investeringsbeslissing een rol spelen in kaart te brengen. Dergelijke analyses zijn nuttig en zullen bijdragen aan een verbetering van de kwaliteit van de voorspellingen van besparingspotentiëlen. We zijn echter van mening dat – zelfs wanneer er geen meetproblemen zouden zijn – dit eenvoudige raamwerk niet volstaat om in alle gevallen een goede beschrijving van adoptiegedrag en diffusiepatronen van technologieën te geven. De reden is dat het model een aantal strikte veronderstellingen kent, zoals rationeel gedrag, volledig informatie, afwezigheid van onzekerheid en perfecte kapitaalmarkten, die in de realiteit vaker afwezig dan aanwezig zijn. Deze constatering geeft daarmee direct zicht op een aantal barrières voor adoptie van technologieën: niet-rationeel gedrag, onvolledige informatie, onzekerheid en gebrek aan kapitaal kunnen adoptie vertragen. Daarom zullen we in de volgende paragraaf een aantal alternatieve bijdragen in de literatuur bespreken die ingaan op deze en enkele andere barrières.

### **3.4 Een analyse van barrières**

#### **3.4.1 Satisficing en niet-rationeel gedrag**

Tot nu toe zijn we uitgegaan van de gedragshypothese dat ondernemingen zich rationeel gedragen bij het nemen van een besluit om al dan niet tot de adoptie van een bepaalde technologie over te gaan en beschikken over volledige informatie. Rationeel gedrag van producenten wil in de neo-klassieke economische theorie zeggen dat zij hun winst maximaliseren, gegeven aanwezige beperkingen en met vermindering van systematische fouten in het maken van keuzen. Een alternatieve gedragshypothese is voorgesteld door Simon (1955) en gaat uit van het zogenaamde 'satisficing principe'. Volgens dit principe streven ondernemers naar 'bevredigende' winst en niet noodzakelijk naar maximale winst. Bovendien benadrukt hij dat ondernemers vaak gebruik maken van vuistregels en routines bij het



nemen van beslissingen. Deze benadering is nader uitgewerkt in de evolutionaire theorie (zie Nelson en Winter (1982) en hoofdstuk 2 in dit boek). De relevantie van dergelijke theorieën wordt geïllustreerd door Jaffe en Stavins (1995) en Hassett en Metcalf (1995). Zij laten zien dat subsidies die bedrijven ontvangen bij het adopteren van een technologie drie tot acht keer effectiever zijn dan equivalente belastingreducties op het gebruik van energie die een onderneming ontvangt gedurende de gehele gebruiksperiode van de technologie. Dit resultaat laat zien dat bedrijven gevoeliger zijn voor korte termijn baten die direct worden ontvangen bij aanschaf van de technologie (de subsidie), dan voor baten die verder in de toekomst worden genoten.

### 3.4.2 Onvolledige informatie

Informatie is een essentiële voorwaarde voor een gezond investeringsbeleid van ondernemingen (Howarth en Sanstad 1995). Het vergaren van informatie is dus een eerste noodzakelijke stap alvorens een onderneming tot adoptie over kan gaan. Het belang van informatie als een factor die bij kan dragen aan het verklaren van feitelijke adoptiebeslissingen is met name benadrukt in relatie tot bedrijven in het Midden en Klein Bedrijf (MKB). Studies van bijvoorbeeld Kleinknecht (1989), Gillissen et al. (1995), Velthuisen et al. (1995) en De Groot et al. (2001) hebben aangetoond dat een significant deel van de beschikbare technologieën niet bekend is in het MKB. De informatie-achterstand is met name groot in bedrijven die slechts aan beperkte concurrentie blootstaan en in kleine ondernemingen die relatief weinig investeren. Niet alleen blijken veel bedrijven niet op de hoogte te zijn van beschikbare technologie, maar ook zijn veel bedrijven niet op de hoogte van beleidsmaatregelen en instituties die adoptie trachten te bevorderen. We verwijzen hier bijvoorbeeld naar Kleinknecht (1989) voor een studie gericht op het Nederlandse bedrijfsleven.

We kunnen aantal oorzaken opnoemen voor het bestaan van de informatieachterstand. Voor met name kleine bedrijven kan het vinden van technische informatie lastig zijn. Ook kan gebrek aan financieel en menselijk kapitaal dat is vereist om aan de informatie te komen een rol spelen (McGregor en Gomes 1999, Bianchi en Noci 1998, en Lybaert 1998). Dit type factoren wijst erop dat schaalvoordelen een belangrijke rol spelen bij het vergaren van informatie. Verder spelen netwerkeffecten vaak een belangrijke rol bij informatieverspreiding. Het behoren tot een netwerk en het opereren in de nabijheid van gelijksoortige ondernemingen die gelijksoortige beslissingen nemen kan de vergaring van informatie bevorderen door het reduceren van zoekkosten, contractkosten, etc. en daarmee adoptie bevorderen (en vice versa).

### 3.4.3 Beperkte financiële middelen

Voldoende financieel kapitaal is een tweede noodzakelijke voorwaarde alvorens een bedrijf tot adoptie van een technologie over kan gaan. Evenals bij informatie zijn er ook hier duidelijke aanwijzingen dat gebrek aan financieel kapitaal met name een rol speelt in het MKB, en dan met name voor starters. Het betreft hier bedrijven die vaak slechts beperkte mogelijkheden hebben voor risicospreiding en een beperkte hoeveelheid eigen vermogen hebben waaruit adoptiekosten kunnen worden gefinancierd (Kleinknecht 1989, Winker

1999). Specifiek voor de adoptie van energie-efficiënte technologie heeft Velthuisen (1995) het belang van kapitaalrestricties laten zien.<sup>4</sup>

### 3.4.4 Onzekerheid<sup>5</sup>

Een verklaring voor de energie-efficiëntie paradox die het rationaliteitsprincipe volledig respecteert, biedt de theorie van het investeren onder onzekerheid.<sup>6</sup> Deze theorie leert dat bij het bestaan van onzekerheid het uitstellen van beslissingen een volkomen rationele strategie kan zijn. Het gaat daarbij om investeringen die in belangrijke mate onomkeerbaar zijn (bijvoorbeeld doordat de aangeschafte kapitaalgoederen niet of nauwelijks op de tweede-hands markt te slijten zijn). De essentie van de theorie kan worden geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Dit voorbeeld is beschreven in Box A.

In het voorbeeld in Box A ligt de nadruk op investeringen in energiezuinige technologie, terwijl er onzekerheid bestaat over toekomstig beleid.<sup>7</sup> Het potentiële toepassings-terrein van de theorie van het investeren onder onzekerheid is echter veel breder en kan tal van interessante inzichten opleveren. Zo zijn bedrijven onzeker over toekomstige afzet, prijsontwikkelingen, kwaliteit en bruikbaarheid van nieuwe technologie, etc. Deze onzekerheid is van belang voor investeringsgedrag, maar ook voor bijvoorbeeld allocatiebeslissingen en beslissingen om toe- of uit te treden in een markt. Met betrekking tot dit laatste punt kan de theorie bijvoorbeeld verklaren waarom ondernemingen bij forse verliezen (waarbij zelfs de variabele kosten niet worden gedekt) hun activiteiten niet opschorten, en waarom er bij forse winsten geen toetreding plaatsvindt. Ook bij investeringen die stapsgewijs worden uitgevoerd (zoals bijvoorbeeld de ontwikkeling van nieuwe producten, waarbij eerst moet worden geïnvesteerd in R&D en vervolgens het productie-apparaat moet worden geïnstalleerd), spelen onzekerheden en onomkeerbaarheden een grote rol: beter ten halve gekeerd dan ten hele gedwaald. Het is dan ook niet verwonderlijk dat bedrijven een voorkeur hebben voor die technologieën, die wellicht wat duurder zijn in gebruik maar die gemakkelijker kunnen worden aangepast wanneer marktontwikkelingen of technische ontwikkelingen daartoe aanleiding geven.<sup>8</sup>

<sup>4</sup> In hoeverre hier sprake is van een marktfalen dat overheidsingrijpen vereist is overigens niet op voorhand duidelijk. Het gebrek aan toegang tot financieel kapitaal komt vaak voort uit gebrekkige liquiditeit en solvabiliteit, relatief grote kans op faillissement en de daarmee samenhangende relatief grote risico's. Desalniettemin heeft de Nederlandse overheid verschillende beleidsinstrumenten ontwikkeld in de vorm van starters-subsidies, subsidies op adoptie (die vaak variëren met de omvang van het bedrijf), etcetera die tot doel hebben de omvang van de restricties te beperken.

<sup>5</sup> Deze paragraaf is in belangrijke mate gebaseerd op De Groot en Van Soest (1999).

<sup>6</sup> Deze theorie wordt op een zeer inzichtelijke wijze uiteengezet in A.K. Dixit en R.S. Pindyck (1994).

<sup>7</sup> De lezer die enigszins vertrouwd is met de hier besproken theorie zal wellicht verrast (of teleurgesteld) zijn dat we niet uitgebreid zijn ingegaan op de wiskundige technieken van het optimaliseren onder onzekerheid met alle toeters en bellen van Wiener-processen, Ito's Lemma, en stochastische calculus (zie Dixit en Pindyck, *op.cit.*). We zijn echter van mening dat met het hier besproken voorbeeld de essentie van de theorie is weergegeven en dat daarmee voor het doel van dit hoofdstuk kan worden volstaan.

<sup>8</sup> Voor meer voorbeelden, zie R.S. Pindyck (1991).

**Box A. Investeren in energiebesparing: Een eenvoudig voorbeeld**

Stel dat een onderneming zijn huidige machinepark zodanig kan aanpassen dat een (maximale) energiebesparing van twintig procent kan worden gerealiseerd. De kosten van een dergelijke aanpassing worden geacht zo laag te zijn dat de investering reeds bij de huidige energieprijzen winstgevend is: de verwachte netto-contante waarde (*NCW*) is positief. Bij het nemen van de investeringsbeslissing wordt de ondernemer echter geconfronteerd met talloze vormen van onzekerheid. Zo kan er onzekerheid zijn over de deugdelijkheid van de nieuwe technologie, onzekerheid over de prijsontwikkeling op de afzetmarkt en op de markt voor inputs, maar ook onzekerheid over toekomstig overheidsbeleid. Al deze vormen van onzekerheid hebben invloed op de verwachte netto-contante waarde van het investeringsproject. Stel nu dat er onzekerheid is over het toekomstig milieubeleid. Toekomstige normen kunnen de onderneming bijvoorbeeld dwingen het energieverbruik niet met twintig, maar met dertig procent terug te brengen. We gaan ervan uit dat om aan een dergelijke eis te voldoen, een drastische wijziging in het productieproces vereist is, en dat er in de tweede periode volledige duidelijkheid ontstaat over het te voeren beleid. Tabel 1 bevat een eenvoudig cijfervoorbeeld om een en ander te illustreren. De huidige productietechnologie kan door adoptie van technologie A zodanig worden aangepast dat (tegen bepaalde kosten) een energiebesparing van 20% wordt gerealiseerd. Ervan uitgaande dat de onderneming één eenheid energie verbruikt en dat die eenheid één gulden kost, zijn de jaarlijkse besparingen dus 0,2. In het vervolg gaan we ervan uit dat de kans dat een strenge norm van 30% energiebesparing wordt opgelegd in de volgende periode vijftig procent is en dat de verdisconteringsvoet tien procent bedraagt.

Tabel 1: beschrijving van de twee technologieën

	Technologie A	Technologie B
Opbrengst investering per jaar ( $R$ )	0,2	0,3
Investeringskosten ( $I$ )	1	3
Verwachte netto-contante waarde ( $t = 0$ )	1/11	0

De onderneming heeft nu een aantal opties tot zijn beschikking. Ze kan nu investeren in technologie A of B. In het eerste geval moet de onderneming er rekening mee houden dat ze na één periode alsnog over moet stappen op technologie B. De *verwachte* netto-contante waarde van het nu investeren in technologie A (rekening houdend met de kans dat na een periode de investering waardeloos is geworden als gevolg van implementatie van strenger milieubeleid) is 1/11.<sup>9</sup> Technologie B voldoet altijd aan de milieu-eisen, maar heeft een verwachte *NCW* van 0. Op basis van deze gegevens ligt het dus voor de hand te concluderen dat de onderneming direct in periode 0 zal investeren in technologie A. Er is echter nog een derde alternatief voor de onderneming. Ze kan namelijk besluiten een periode te wachten met investeren totdat duidelijk is geworden hoe het milieubeleid er uit zal gaan zien. In dat geval zal de onderneming met een periode vertraging investeren in technologie A, *tenzij* milieueisen worden aangescherpt. De verwachte netto-contante waarde van deze beslissing tot uitstel is 5/11 en valt dus te prefereren boven het direct investeren in technologie A.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Deze *NCW* is gelijk aan  $-I_A + \frac{R_A}{1+r} + q \left[ \frac{1}{1+r} \sum_{t=1}^{\infty} \frac{R_A}{(1+r)^t} \right] + (1-q) \left[ \frac{-I_B}{1+r} + \frac{1}{1+r} \sum_{t=1}^{\infty} \frac{R_B}{(1+r)^t} \right]$ , waarbij geldt dat  $r=0.1$ ,  $q=0.5$ ,  $I_A=1$ ,  $I_B=3$ ,  $R_A=0.2$ ,  $R_B=0.3$ .

<sup>10</sup> Deze Netto Contante Waarde is  $\frac{1}{1+r} \left[ q \left( -I_A + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{R_A}{(1+r)^t} \right) + (1-q) \left( -I_B + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{R_B}{(1+r)^t} \right) \right]$ .

Dit eenvoudige voorbeeld illustreert de essentie van de theorie van het investeren onder onzekerheid. Gegeven de onomkeerbaarheid van veel investeringen (in die zin dat investeringskosten als verzonken moeten worden beschouwd), kan het volkomen rationeel zijn om niet direct te investeren in technologieën die een verwachte positieve netto-contante waarde, maar te wachten totdat er nieuwe informatie beschikbaar komt. Door te wachten kan de ondernemer voorkomen dat hij investeert in een technologie die achteraf verliesgevend blijkt te zijn (en die niet meer ongedaan gemaakt kan worden). Er is met andere woorden een optiewaarde verbonden aan het wachten met investeren totdat er nieuwe informatie beschikbaar komt. Het is deze optiewaarde die in de standaard NCW-berekeningen vaak wordt vergeten en die zeer hoog kan zijn. Toepassing van deze theorie geeft dus een mogelijk antwoord op de vraag waarom ondernemingen niet investeren in technologieën die volgens standaard waarderingsmethoden winstgevend zijn: de standaard waarderingsmethoden zijn onjuist!

De theorie van investeren onder onzekerheid levert een aantal lessen op voor beleidsmakers. Om ondernemers ertoe aan te zetten te investeren in technologieën (die bijvoorbeeld het milieu ten goede komen) is duidelijkheid omtrent het beleid dat gevoerd zal gaan worden van cruciaal belang. Gegeven de vaak hoge kosten die verbonden zijn aan de implementatie van nieuwe technologieën die moeilijk achteraf ongedaan gemaakt kunnen worden, zullen ondernemers zich wel twee keer achter de oren krabben alvorens tot investeren over te gaan. Zij zullen willen voorkomen, dat ze investeren in installaties die later niet aan aangescherpte en onverwacht geïmplementeerde milieu-eisen blijken te voldoen. In het recente beleid volgt het ene milieubeleidsplan (*NMP*) op het andere en is lang niet altijd duidelijk hoe milieubeleid er precies uit zal gaan zien. Dit kan mogelijk verklaren waarom rationeel opererende bedrijven weliswaar kunnen beschikken over vele veelbelovende technologieën, maar deze (nog) niet implementeren.

### 3.4.5 Jaargangenbenadering, complementariteiten en netwerkexternaliteiten

In de analyses tot nu toe hebben we een technologie steeds in isolatie bekeken. Deze benadering is potentieel problematisch om drie redenen. Ten eerste worden technologieën veelal aangeschaft door reeds lang bestaande ondernemingen. Dergelijke ondernemingen hebben reeds een uitgebreid machinepark tot hun beschikking dat veelal nog niet volledig is afgeschreven. Zij zullen daarom niet per direct overschakelen op de nieuwe technologie, zelfs niet wanneer die winstgevender is dan de huidige in gebruik zijnde technologie. De relevantie hiervan krijgt nadruk in jaargangenbenaderingen van technologie-adoptie.

Ten tweede maakt een technologie *binnen* een bedrijf deel uit van een uitgebreid productieproces. In een dergelijke productieketenbenadering kan de kwaliteit van de ene technologie de netto-contante waarde van een andere technologie beïnvloeden. Er zijn met andere woorden 'returns to variety'.<sup>11</sup> De consequenties van een dergelijke visie op technologie en de relevantie van het bestuderen van hun onderlinge samenhang zijn recent bestudeerd in Mulder et al. (2003). Zij bestuderen onder andere de effecten van het bestaan van complementariteiten. Bij complementariteiten is er sprake van meeropbrengsten als gevolg van het in gebruik hebben van een diversiteit aan (jaargangen van) technologie-

<sup>11</sup> Conform Dixit en Stiglitz (1977) en Ethier (1982). Deze inzichten zijn later uitgebouwd in de endogene groeitheorie door onder andere Romer (1990), Grossman en Helpman (1991) en De Groot en Nahuys (2002).

en. Mulder et al. (2003) laten zien dat het bestaan van complementariteiten alsmede het bekende fenomeen van het geleidelijk beter worden van een technologie in de loop van de tijd er toe leidt dat ondernemingen door kunnen gaan met het investeren in relatief oude technologieën die – wanneer ze in isolatie worden beschouwd – slechter zijn dan de meest recente jaargangen. Dit resulteert in een vertraagde en geleidelijke verspreiding van nieuwe technologieën in het productieproces aangezien er nog wordt geïnvesteerd in oude technologieën, zelfs al zijn er nieuwe technologieën beschikbaar, waardoor oude technologieën nog een tijd blijven bestaan in plaats van dat ze (direct) worden afgeschreven, zoals mag worden verwacht in afwezigheid van complementariteiten.

Een derde reden waarom we een afzonderlijke technologie niet in isolatie kunnen bekijken, is dat het presteren van een technologie in het ene bedrijf beïnvloed kan worden door het presteren van een technologie in een ander bedrijf. Er is dan sprake van complementariteiten tussen bedrijven. De aanwezige onderlinge verbanden (netwerken) tussen technologieën, infrastructuren en gebruikers kunnen leiden tot (positieve) externaliteiten doordat de netwerken waardevoller worden voor de gebruikers naarmate ze groter worden. We spreken dan van netwerkexternaliteiten.<sup>12</sup> Bijvoorbeeld, een telefoonnetwerk neemt in waarde toe naarmate er meer abonnees zijn die via het netwerk bereikt kunnen worden.

Met behulp van netwerkexternaliteiten valt goed te begrijpen waarom het vaak een tijdje duurt voordat een diffusieproces echt op gang komt (los van informatieverbreiding zoals in paragraaf 3.4.2 werd besproken). Aangezien de welvaart wordt geschaad als diffusieprocessen traag op gang komen ten gevolge van free-rider gedrag in een economie met netwerkexternaliteiten, kan vanuit een welvaartsoogpunt overheidsingrijpen gewenst zijn. Dit kan bijvoorbeeld door met opstartsubsidies voor nieuwe projecten de problemen van vertraagde diffusie te verminderen.

Netwerkexternaliteiten kunnen tevens aanleiding geven tot toenemende meeropbrengsten. Bij toenemende meeropbrengsten treedt er een positieve spiraal op van investeren in bepaalde (dominante) technologieën, waardoor diezelfde technologieën productiever worden, een groter marktaandeel krijgen, waardoor de concurrentiekracht van alternatieve technologieën vermindert en het aantrekkelijker wordt om nog meer te investeren in de dominante technologie. Uiteindelijk kunnen dergelijke toenemende meeropbrengsten leiden tot situaties van technologische lock-in: als een technologie eenmaal op grote schaal wordt toegepast zit de economie door de toenemende meeropbrengsten opgesloten in die technologie. Als er een 'betere' alternatieve technologie bestaat, kan een situatie van lock-in vanuit welvaartsoogpunt suboptimaal zijn en derhalve aanleiding geven tot overheidsingrijpen.

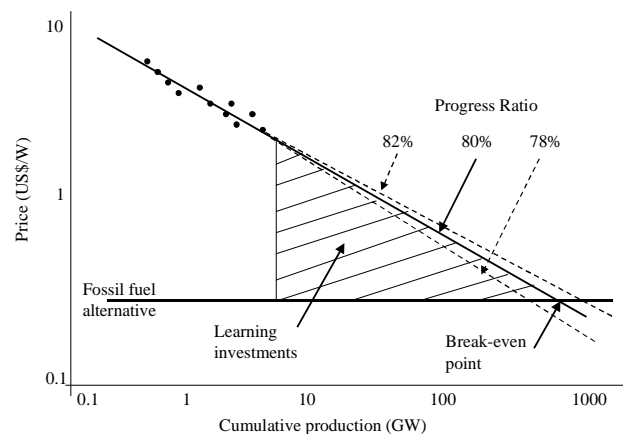
Er worden in de literatuur drie belangrijke klassen van toenemende meeropbrengsten geïdentificeerd: netwerkexternaliteiten, leereffecten en schaalvoordelen (Arthur, 1994). Netwerkexternaliteiten treden, zoals eerder aangegeven, op als gevolg van onderlinge verbanden tussen technologische systemen en gebruikers. Leereffecten treden op wanneer als gevolg van de cumulatieve kennis de kosten van het gebruik van een technologie afnemen en/of de prestaties van de technologie toenemen. We zullen in paragraaf 3.4.6 uitgebreid terugkomen op het verschijnsel van leereffecten. Van schaalvoordelen is sprake wanneer ten gevolge van (hoge) vaste kosten de kosten per eenheid product afnemen bij stijgend productievolume. In alle gevallen kan een mechanisme in werking treden

<sup>12</sup> Zie Besen en Farrell (1994) en Katz en Shapiro (1994) voor baanbrekend werk op dit terrein.

waarbij de toenemende meeropbrengsten leiden tot specialisatie en uiteindelijk tot een eventueel ongewenste situatie van lock-in.

### Box B. Leren vereist investeren

Een leercurve geeft het verband weer tussen enerzijds de kosten van een technologie per eenheid geleverde dienst en anderzijds de cumulatieve output geproduceerd met die technologie of de cumulatieve geïnstalleerde capaciteit van die technologie. Hoe sterker het negatieve verband tussen de kosten van de geleverde dienst en de cumulatieve output of investeringen, des te hoger is de 'leersnelheid'. Een belangrijke toepassing van leereffecten ligt in het inschatten van de toekomstige ontwikkeling van nieuwe technologieën op basis van een extrapolatie van het eerste - empirisch gefundeerde - deel van de leercurve van een technologie. Bij het bestaan van een uit milieu-economische overwegingen superieure maar vooralsnog relatief dure techniek kan de te installeren cumulatieve capaciteit bepaald worden die nodig is om de duurzame technologie kostenefficiënt of concurrerend met de reeds gebruikte bestaande technologieën te laten zijn. Deze redenatie is geïllustreerd in de figuur (bron: OECD/IEA, 2000).



In de figuur geeft de 'Progress Ratio' een indicatie van de prestatie van een technologie over de tijd: Een 'Progress Ratio' van 80% geeft aan dat de prijs van een technologie met 20% afneemt bij elke verdubbeling van de cumulatieve output of investeringen. Deze 20% wordt ook wel de 'Learning Rate' genoemd. De verticale afstand tussen de dalende en horizontale lijn geeft het prijsverschil weer tussen de nieuwe technologie en een bestaande technologie die momenteel door de markt als meest efficiënt wordt gezien ('fossil fuel alternatief'). Dit prijsverschil neemt bij het bestaan van een leereffect af door penetratie van de nieuwe technologie. De gearceerde oppervlakte is derhalve een indicatie voor de meerkosten ten opzichte van de bestaande techniek die gemaakt moeten worden alvorens een nieuwe, energiebesparende, technologie concurrerend is met een bestaande, energie-intensieve, technologie, en wordt daarom aangeduid als 'learning investments'. Hiermee raken we aan de belangrijkste boodschap van het bestaan van leercurven: leren vereist investeren.

Leercurven geven inzicht in de dynamiek van technologische ontwikkeling en dus in iets wat in de economie lange tijd als black box is beschouwd. Echter, de leercurve zelf valt in zekere zin ook als een black box te typeren: ze geeft weinig inzicht in de oorzaken of mechanismen die ten grondslag liggen aan de empirisch vastgestelde prijsdaling van technologieën. Die prijsdaling kunnen namelijk, behalve leereffecten, ook het gevolg zijn van schaafeffecten, 'spill-over' effecten door kennis te importeren vanuit het buitenland, of gewoon door marktontwikkelingen (zoals de toetreding van concurrenten). De verschillende mogelijke oorzaken van de prijsdaling kunnen in de praktijk vaak moeilijk onderscheiden worden.

### 3.4.6 Leereffecten en de dynamische ontwikkeling van technologie<sup>13</sup>

In het analyse-kader dat is besproken in paragraaf 3.2 wordt (impliciet) verondersteld dat kosten en baten van een technologie in de loop van de tijd constant zijn. Deze veronderstelling is in strijd met de empirische inzichten uit de literatuur over leercurven (zie bijvoorbeeld OECD/IEA, 2000). Een leercurve geeft het verband weer tussen enerzijds de kosten van een technologie per eenheid geleverde dienst en anderzijds de cumulatieve output geproduceerd met die technologie of de cumulatieve geïnstalleerde capaciteit van die technologie (zie voor illustratie Box B). Uit veel overtuigend empirisch materiaal blijkt dit verband (meestal) negatief te zijn. Met andere woorden, er is sprake van een afname van de kosten/prijs van een technologie dan wel verbeterd presteren, naarmate er meer gebruik van de technologie wordt gemaakt. De meest populaire verklarende hypothese voor dit verband is het bestaan van leereffecten: naarmate een technologie meer wordt toegepast treden er leereffecten op ('learning-by-doing' en 'learning-by-using')<sup>14</sup> waardoor zowel de technologie zelf verbetert als ook de gebruikersefficiëntie. Hierin schuilt ook de keerzijde van leereffecten: in tegenstelling tot nieuwe technologieën hebben bestaande technologieën kunnen profiteren van leereffecten waardoor zij relatief betrouwbaar ("je weet wat je hebt"), efficiënt en (daardoor) rendabel zijn. Nieuwe technologieën zijn over het algemeen potentieel 'beter' (in termen van productkwaliteit, efficiëntie, etc.) maar op het moment van adoptie moet dit potentieel nog wel gerealiseerd worden. Dit betekent dat overstappen op een nieuwe technologie in elk geval op korte termijn kostbaar is: de kennis die is opgedaan door het werken met een oude technologie gaat (deels) verloren, hetgeen een barrière voor adoptie kan zijn. We spreken in dit geval ook wel van een situatie van lock-in.

Voor een aantal milieuproblemen kan de oplossing gelegen zijn in het overstappen op (een cluster van) nieuwe technologieën: een transitie van het gebruik van emissie-intensieve technologieën naar het gebruik van technologieën die minder emissie-intensief zijn. Gerlagh en Hofkes (2002) bestuderen een twee-sector economie met leereffecten en spillovers tussen bedrijven en analyseren welk beleid een dergelijke transitie kan induceren in het geval van een ongewenste situatie van lock-in. Zij laten zien dat er in een economie met leerspill-overs en 'milieuproblemen' sprake kan zijn van drie verschillende externaliteiten: een investeringsexternaliteit, een 'keuze van technologie'-externaliteit en een milieu-externaliteit. Hieronder worden deze drie externaliteiten kort beschreven, mede in relatie tot het bestaan van situaties van lock-in, en wordt aangegeven wat de implicaties voor het beleid zijn van het bestaan van dergelijke externaliteiten.

Het bestaan van spill-overs tussen bedrijven leidt tot een situatie waarin er minder geïnvesteerd wordt dan vanuit welvaartsoogpunt optimaal zou zijn: er is sprake van een zogenaamde investeringsexternaliteit, die vergelijkbaar is met de in paragraaf 3.4.5 beschreven netwerkexternaliteit. Immers, een spill-over effect impliceert dat meerdere bedrijven profiteren van een investering gedaan door één bedrijf, hetgeen betekent dat het bedrijf dat investeert baten genereert voor andere bedrijven terwijl het zelf alle kosten van de investeringen draagt. Een subsidie kan bijvoorbeeld zorgen dat deze onevenwichtigheid tussen kosten en baten van een investering wordt recht getrokken, oftewel dat de investe-

<sup>13</sup> Deze paragraaf is deels gebaseerd op Mulder en de Groot (2000).

<sup>14</sup> Learning-by-doing betreft producenten van een technologie die in de loop van de tijd leren om de kwaliteit van de technologie te verhogen (evt. tegen lagere kosten). Learning-by-using betreft gebruikers van een technologie die in de loop van de tijd leren om efficiënter om te gaan met de technologie. Zie Rosenberg (1982), 121-122.

ringsexternaliteit kan worden geïnternaliseerd door een onderneming, zodat er een optimaal niveau van investeringen tot stand komt. Naast de noodzaak van beleid met betrekking tot de omvang van de investeringen, kan er ook beleid noodzakelijk zijn met betrekking tot de richting van de investeringen. Er is dan sprake van een zogenaamde 'keuze van technologie' externaliteit: om te voorkomen dat de economie zich specialiseert in een vanuit welvaartsoogpunt ongewenste technologie, en daarmee een ongewenste situatie van lock-in ontstaat, kan het nodig zijn dat de overheid de economie in de goede richting leidt. De overheid kan hierbij bijvoorbeeld trachten convergente verwachtingen te creëren met betrekking tot investeringen in een bepaald technologiecluster door specifieke ondersteuning aan te kondigen van het geprefereerde technologiepad. Tot slot kan er sprake zijn van een milieu-externaliteit als de economie zich gespecialiseerd heeft in het gebruik van emissie-intensieve technologieën. Een dergelijke milieu-externaliteit (te veel vervuiling door het ontbreken van een adequate prijs) kan geïnternaliseerd worden door een zogenaamde Pigovianse heffing: emissies worden zodanig belast dat ze beperkt worden tot het vanuit welvaartsoogpunt optimale niveau. Het internaliseren van de milieu-externaliteit neemt echter niet weg dat er nog steeds sprake kan zijn van een ongewenste lock-in en daarmee ruimte voor overheidsingrijpen om een transitie op gang te brengen. Als een transitie niet vanzelf op gang komt, maar wel vanuit welvaartsoogpunt gewenst is kan deze bijvoorbeeld beleidsmatig geïnduceerd worden door een heffing aan te kondigen die boven het Pigovianse niveau ligt. Deze aankondiging kan ervoor zorgen dat de investeringen zich verplaatsen naar de milieuvriendelijkere technologieën en de economie zich in deze 'betere' technologieën gaat specialiseren.

Bovenstaande beleidsaanbevelingen betreffen (het aankondigen van) heffingen en subsidies die ervoor kunnen zorgen dat de nieuwe, 'betere' technologie geadopteerd wordt, leereffecten gegenereerd kunnen worden en de nieuwe technologie op het kosten-niveau gebracht wordt waarop ze concurrerend is met de gevestigde technologie. Een andere beleidsaanbeveling betreft het stimuleren en eventueel beschermen van nichemarkten. Voor de keuze tussen alternatieve beleidsopties is het overigens van belang onderscheid te maken tussen (1) de situatie waarin niemand het potentieel van de technologie kent en (2) waarin de overheid het potentieel kent.

Een nichemarkt is een (klein) marktsegment met specifieke kenmerken waarin een nieuwe technologie een bepaalde – op die specifieke kenmerken toegespitste – toepassing krijgt. Nichemarkten spelen een belangrijke rol als 'springplank' naar een dominante markt doordat daar leereffecten worden gegenereerd die leiden tot een prijsdaling die een nieuwe technologie op langere termijn concurrerend kan maken in dominante markten. Bijvoorbeeld, PV ("zonnecellen") technologie kan nog niet op grote schaal concurreren met energieproductie op basis van fossiele brandstoffen maar soms wel rendabel worden toegepast in nichemarkten zoals afgelegen en/of stedelijke gebieden. In die niches kan PV soms goed concurreren met bestaande technologie door het overbodig maken van kostbare conventionele distributienetwerken naar afgelegen gebieden of grote investeringen in productiecapaciteit om in stedelijke gebieden in piekuren aan de energievraag te kunnen voldoen. Tevens kunnen niche-markten helpen om een 'lock-in' in één specifieke (traditionele) technologie te voorkomen. Toepassing van nieuwe (energiebesparende) technologieën in kleinere marktsegmenten kan voorkomen dat een gevestigde (energie-intensieve) technologie via leer- en schaaffecten zo dominant wordt dat de economie 'opgesloten' raakt in die technologie. Hoewel 'lock-in' op zich zelf geen rechtvaardiging voor beleid of interventie is (een 'lock-in' kan immers efficiënt zijn door een concentratie van het leereffect), brengt een 'unlocking', dat wil zeggen ervoor zorgen dat er overgestapt wordt op een andere technologie, vaak erg hoge kosten met zich mee. Indien een 'unlocking' gewenst is



vanwege het bestaan van externaliteiten, zoals CO<sub>2</sub> emissies bij het gebruik van energie-intensieve technologieën, is er reden voor actief beleid. In dat geval kunnen niche-markten van dienst zijn met het 'in leven houden' van alternatieve technologieën.<sup>15</sup>

Tot slot kunnen leercurven een raamwerk bieden voor het formuleren en evalueren van een kosteneffectief subsidieprogramma. Een belangrijke indicator voor kosteneffectiviteit is de verhouding tussen de totale investeringen in het leerproces ('learning investments') en de door de overheid verstrekte subsidies ter ondersteuning van dit leerproces. In het geval dat deze ratio kleiner is dan 1 subsidieert de overheid investeringen die de marktpartijen hoe dan ook hadden gedaan. Overigens moet wel opgemerkt worden dat een beleidsmaker, vanwege de onzekerheden die inherent zijn aan een ex-ante beoordeling, nooit blind mag varen op een leercurve.

### 3.4.7 Gevestigde belangen en weerstand tegen technologische vernieuwing

Een laatste beperking van het netto-contante waarde raamwerk uit paragraaf 3.2 is dat het alleen kijkt naar de totale netto-contante waarde en niet naar de verdeling daarvan tussen verschillende betrokken partijen. In veel gevallen is niet alleen de omvang maar ook de verdeling van de 'cake' van belang om feitelijk adoptiegedrag te kunnen verklaren. Voorbeelden uit de geschiedenis zijn er te over (Mokyr, 1990, en Olson, 1982).

Een bekend voorbeeld uit de literatuur van verdelingsproblemen die kunnen leiden tot 'stagnatie' is dat van een huiseigenaar die de mogelijkheid heeft een zuinige verwarmingsinstallatie te installeren, waarvan de huurder de voordelen geniet in de vorm van een lagere energierekening. In een dergelijke geval kan de situatie ontstaan dat de netto-contante waarde van installatie positief is, maar dat installatie niet van de grond komt omdat de huiseigenaar, die de beslissing moet nemen, alleen maar met kosten wordt geconfronteerd en de huurder de baten geniet. Vergelijkbare situaties kunnen zich voordoen in bedrijven waarin afdelingen die elk een eigen budget hebben niet in staat zijn om verdelingsproblemen als hierboven beschreven op te lossen (DeCanio, 1998).

In principe kunnen de hierboven geschetste problemen uiteraard opgelost worden, door bijvoorbeeld contractaanpassingen. In het geval van de huiseigenaar is het denkbaar dat contractueel overeen wordt gekomen dat de huur voor de woning stijgt na installatie van de nieuwe verwarmingsinstallatie met een bedrag dat – verdisconteerd – hoger is dan de kosten van installatie, maar lager dan de totale netto-contante waarde van installatie. In een dergelijk geval profiteren zowel de huiseigenaar als de huurder. Het opstellen van dergelijke contracten is echter lastig en duur.

Een andere vorm van verdelingsproblemen kan bijvoorbeeld ontstaan wanneer een bedrijf een heterogene groep arbeiders in dienst heeft. In een dergelijk geval zijn situaties denkbaar dat een bepaalde subgroep voordelen geniet van adoptie van een nieuwe technologie terwijl een andere groep erop achteruit gaat. Denk bijvoorbeeld aan verschillen in leeftijd waarbij vaak oudere werknemers met relatief hoge kosten (en lage baten) van omschakeling worden geconfronteerd in vergelijking met jonge werknemers (Canton et al., 2002). Het bekendste voorbeeld van de relevantie hiervan heeft betrekking op de vormgeving van toetsenborden. Het is welbekend dat de snelheid van tekstverwerken groter kan zijn wanneer van het huidige QWERTY systeem overgeschakeld zou worden op een systeem met een andere ordening van de toetsen. Belangrijke reden voor het niet overschake-

<sup>15</sup> Dit komt verder aan bod in hoofdstuk 2 en hoofdstuk 10. Zie verder Kemp et al. (1998) en Hoogma et al. (2002) voor studies naar strategisch niche management.

len op een dergelijk systeem is ongetwijfeld de hoge omschakelingskosten voor typisten die geleerd hebben te werken met het QWERTY systeem. Het is in dit specifieke voorbeeld evident dat de kosten voor nieuwe typisten verwaarloosbaar zijn omdat het voor hen niet uitmaakt wat voor systeem zij aanleren.

### 3.5 Conclusie

Het stimuleren van technologische ontwikkeling vormt op de lange termijn de sleutel tot een duurzaam energiebeleid. In bottom-up studies wordt veelal betoogd, dat het voldoen aan bijvoorbeeld Kyoto-doelstellingen – gegeven de beschikbare technologieën en de kosten-baten verhouding die deze technologieën karakteriseert – vrij eenvoudig en tegen lage kosten te bereiken is. De relatief trage adoptie van schone technologie die we in de praktijk waarnemen weerlegt deze conclusie. We hebben in dit hoofdstuk betoogd dat de optimistische conclusies, die veelal worden bereikt in bottom-up analyses, samenhangen met een te eenvoudige beschrijving van adoptiegedrag van producenten, die is gebaseerd op een aantal heroïsche veronderstellingen. We hebben deze veronderstellingen de revue laten passeren en laten zien waardoor deze veronderstellingen te optimistische conclusies over besparingspotentiëlen in de hand werken. Daarbij is aandacht gegeven aan het belang van kapitaal- en informatierestricties, het belang van onzekerheid, de relevantie van niet-rationeel gedrag, de mogelijk complexe interacties tussen technologieën en gevestigde belangen die de overschakeling op nieuwe technologieën kunnen frustreren. We hebben bovendien laten zien dat dergelijke alternatieve gedragshypothesen en visies op technologie zich veelal op een eenvoudige wijze laten analyseren met relatief kleine aanpassingen of uitbreidingen van het standaard netto-contante waarde raamwerk dat ten grondslag ligt aan bottom-up analyses. Daarmee hopen we een rijker en adequater kader te hebben geschetst waarmee feitelijk adoptiegedrag en penetratie van technologieën beter kan worden begrepen en verklaard.

De analyse heeft ook inzicht gegeven in barrières die adoptie van schone technologie in de weg kunnen staan. Daarmee bieden we aanknopingspunten voor beleid. Voorbeelden van geïdentificeerde barrières waar beleid op in kan spelen zijn beperkingen in beschikbaarheid van informatie en kapitaal, het bestaan van onzekerheid (waaronder onzekerheid over het door de overheid gevoerde beleid), en lock-in situaties die met bijvoorbeeld subsidies of heffingen kunnen worden voorkomen of ontlopen.

Om concretere beleidsaanbevelingen te kunnen doen is meer gedetailleerde informatie vereist over het (relatieve) belang van de verschillende barrières. Het beschikbare empirische materiaal op dat punt is beperkt en vereist grootschalig onderzoek gericht op individuele bedrijven. Een aantal relevante barrières die uit verschillende studies naar voren komen en aanknopingspunten bieden voor beleid zijn in elk geval informatiebeschikbaarheid voor met name het MKB en onzekerheid over overheidsbeleid. Daarnaast zijn er verschillende barrières waarvan vaak niet duidelijk is of ze overheidsingrijpen vereisen vanuit een optimaliteitsoogpunt. Trage adoptie voortkomend uit de aanwezigheid van nog niet afgeschreven machines, uit kredietrestricties en onzekerheid over prijzen van inputfactoren zijn enkele voorbeelden van de laatste categorie. We pleiten hier voor het beter in kaart brengen van de barrières die (verschillende typen) bedrijven ervaren. Dit vergt micro-economisch onderzoek waarin de gedragscomponent van de investeringsbeslissing centraal staat. Alleen dan kan de energie-efficiëntie paradox nog beter worden begrepen en ontstaan concrete aanknopingspunten voor het beleid gericht op het bereiken van een duurzame samenleving.

## Literatuur

- Arthur, W.B. (1994). *Increasing Returns and Path-Dependence in the Economy*, Ann Arbor: Michigan University Press
- Ballantine, J.W., F.W. Cleveland and C.T. Koeller (1993). 'Profitability, Uncertainty, and Firm Size', *Small Business Economics*, 5, 87-100
- Besen, S.M. and J. Farrell (1994). 'Choosing How to Compete: Strategies and Tactics in Standardization', *Journal of Economic Perspectives*, 8, 117-132
- Beer, J. de (1998). *Potential for Industrial Energy-efficiency. PhD Thesis*. Utrecht: University of Utrecht
- Bianchi, R. and G. Noci (1998). 'Greening" SMEs' Competitiveness', *Small Business Economics*, 11, 269-281
- Canton, E.J.F., H.L.F. de Groot, and R. Nahuys (2002). 'Vested Interests, Population Ageing and Technology Adoption', *European Journal of Political Economy*, 18, 631-652
- David, P. A. (1969). *A Contribution to the Theory of Diffusion*, unpublished manuscript
- DeCanio, S.J. (1998). 'The Efficiency Paradox: Bureaucratic and Organizational Barriers to Profitable Energy-Saving Investments - Firms, Markets, Relational Contracting', *Energy Policy*, 26, 441-454
- Dixit, A.K. and R.S. Pindyck (1994). *Investment under Uncertainty*, Princeton: Princeton University Press
- Dixit, A.K. and J.E. Stiglitz (1977). 'Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity', *American Economic Review*, 67, 297-308
- Ethier, W.J. (1982). 'National and International Returns to Scale in the Modern Theory of International Trade', *American Economic Review*, 72, 389-405
- Gerlagh, R. and M.W. Hofkes (2002). 'Escaping Lock-in: the scope for a transition towards sustainable growth?', Note di Lavoro 12.2002, Venice, Fondazione Eni Enrico
- Gillissen, M. and J.B. Opschoor, J.C.M. Farla and K. Blok (1995). *Energy Conservation and Investment Behaviour of Firms*, Amsterdam: Vrije Universiteit
- Griliches, Z. (1957). 'Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technical Change', *Econometrica*, 48, 501-522
- Groot, H.L.F. de, P. Mulder and D.P. van Soest (2002). *Subsidising the Adoption of Energy Saving Technologies*, Rotterdam: OCFEB Research Memorandum, no. 0201
- Groot, H.L.F. de and R. Nahuys (2002). 'Optimal Product Variety and Economic Growth: The Trade-off between Internal and External Economies of Scale', *Journal of Economics*, 76, 1-32
- Groot, H.L.F. de and D.P. van Soest (1999). 'Investeren onder Onzekerheid', *Economisch Statistische Berichten*, 84, 230-232
- Groot, H.L.F. de, E.T. Verhoef and P. Nijkamp (2001). 'Energy Saving by Firms: Decision-Making, Barriers and Policies', *Energy Economics*, 23, 717-740
- Grossman, G. and E. Helpman (1991). *Innovation and Growth in the Global Economy*, Cambridge Msch: MIT Press
- Hassett, K.A. and G.E. Metcalf (1995). 'Energy Tax Credits and Residential Conservation Investment: Evidence for Panel Data', *Journal of Public Economics*, 57, 201-217
- Hein, L.G. and K. Blok (1995). 'Transaction Costs of Energy Efficiency Improvement', in: European Council for an Energy Efficient Economy (ed.), *Proceedings of the 1995 ECEEE Summer Study*
- Hoogma, R., R. Kemp, J. Schot and B. Truffer (2002). *Experimenting for Sustainable Transport. The Approach of Strategic Niche Management*, London: EF&N Spon

- Howarth, R.B. and A.H. Sanstad (1995). 'Discount Rates and Energy Efficiency', *Contemporary Economic Policy*, 13, 101-109
- Huizinga, J. (1993). 'Inflation Uncertainty, Relative Price Uncertainty, and Investment in U.S. Manufacturing', *Journal of Money, Credit and Banking* 25, 521-557
- Interlaboratory Working Group (1997). *Scenarios of Carbon Reductions: Potential Impacts of Energy Technologies by 2010 and Beyond*, Washington: US Department of Energy
- Jaffe, A.B. and R.N. Stavins (1994). 'The Energy Paradox and the Diffusion of Conservation Technology', *Resource and Energy Economics*, 16, 91-122
- Jaffe, A.B. and R.N. Stavins (1995). 'Dynamic Incentives of Environmental Regulations: The Effects of Alternative Policy Instruments on Technology Diffusion', *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 43-63
- Jaffe, A.B., R.G. Newell and R.N. Stavins (2000). *Technological Change and the Environment*, Cambridge Msch: NBER Working Paper, no. 7970
- Jovanovic, B. (1997). 'Learning and Growth', in: D.M. Kreps and K.F. Wallis (eds), *Advances in Economics and Econometrics: Theory and Applications, Volume II*, Cambridge: Cambridge University Press
- Karshenas, M. and P. Stoneman (1995). 'Technological Diffusion', in: P. Stoneman (ed.), *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change*, Oxford: Blackwell Publishers
- Katz, M.L. and C. Shapiro (1994). 'Systems Competition and Network Effects', *Journal of Economic Perspectives*, 8, 93-115
- Kemp, R., J. Schot en R. Hoogma (1998). 'Regime Shifts to Sustainability through Processes of Niche Formation. The Approach of Strategic Niche Management', *Technology Analysis and Strategic Management*, 10, 175-195
- Kleinknecht, A. (1989). 'Firm Size and Innovation: Observations in Dutch Manufacturing Industries', *Small Business Economics*, 1, 215-222
- Lybaert, N. (1998). 'The Information Use in a SME : Its Importance and Some Elements of Influence', *Small Business Economics*, 10, 171-191
- McGregor, J. and C. Gomes (1999). 'Technology Uptake in Small and Medium-Sized Enterprises: Some Evidence from New Zealand', *Journal of Small Business Management*, 37, 94-102
- Mokyr, J. (1990). *The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress*, New York.: Oxford University Press
- Mulder, P. and H.L.F. de Groot (2000). 'Leren Vereist Investeren', *Economisch Statistische Berichten*, 85, 980-982
- Mulder, P., H.L.F. de Groot, and M. Hofkes (2003). 'Explaining Slow Diffusion of Energy-Saving Technologies; A Vintage Model with Returns to Diversity and Learning-by-Using', *Resource and Energy Economics*, 25, 105-126
- Nelson, R. and S. Winter (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge Msch: Harvard University Press
- OECD/IEA (2000). *Experience Curves for Energy Technology Policy*, Paris: OECD/IEA
- Olson, M. (1982). *The Rise and Decline of Nations: Economic Growth, Stagflation and Social Rigidities*, New Haven: Yale University Press
- Ostertag, K. (1999). *Transaction Costs of Raising Energy Efficiency*, Karlsruhe: Working Paper
- Pindyck, R.S. (1991). 'Irreversibility, Uncertainty and Investment', *Journal of Economic Literature*, 29, 1110-1148
- Romer, P. (1990). 'Endogenous Technological Change', *Journal of Political Economy*, 98, 71-102

### HOOFDSTUK 3

- Rosenberg, N. (1982). *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge: Cambridge University Press
- Shama, A. (1983). 'Energy Conservation in U.S. Buildings, Solving the High Potential/Low Adoption Paradox from a Behavioral Perspective', *Energy Policy*, 11, 148-168
- Simon, H.A. (1955). 'A Behavioral Model of Rational Choice', *Quarterly Journal of Economics*, 69, 99-118
- Stoneman, P. (1983). *The Economic Analysis of Technological Change*, Oxford: Oxford University Press
- Velthuisen, J.W. (1995). *Determinants of Investment in Energy Conservation*, SEO, Amsterdam: University of Amsterdam
- Winker, P. (1999). 'Causes and Effects of Financing Constraints at the Firm Level', *Small Business Economics*, 12, 169-181